

Analoge simulatie van warmte- en waterdamptransport in klimaatkamers voor planten en in de daarbij toegepaste luchtbehandelingsinstallaties

1. Beschrijving en opzet

Ir. R. KOPPE,
Stichting Technische en Fysische Dienst voor de Landbouw,
Wageningen

Ir. P. EUSER,
Technisch Fysische Dienst TNO-TH, Delft

**Analog simulation of heat and mass transfer
in climatized plant growth rooms and
the associated air conditioning equipment**

Samenvatting

Met behulp van een analoge simulatiemethode zijn berekeningen uitgevoerd aan het warmte- en vochttransport in klimaatkamers voor planten en in de daarbij toegepaste luchtbehandelingsinstallaties. Het warmte- en vochttransport is gesimuleerd door middel van twee netwerken met passieve analoge componenten of met rekenschakelingen (actieve componenten).

In die knooppunten die natte oppervlakken voorstellen en waar warmte- en vochttransport elkaar beïnvloeden, zijn de thermische en hygrische netwerken met elkaar verbonden door middel van temperatuur-dampspanningsomzetters en door een verbindende schakeling ter verrekening van verdampings- en condensatiewarmtestromen. Het doel van de berekeningen is een analyse te geven van het stationaire en dynamische gedrag van klimaatkamers voor planten en van de daarbij toegepaste luchtbehandelingsinstallaties bij verschillende belichtingscondities, dag-nachtschakelingen, temperatuur- en vochtbereiken. Kritische aspecten zijn onder meer de functionering van de regelapparatuur, het energieverbruik en de optredende temperatuur- en luchtvochtigheidsfluctuaties.

Summary

By means of an analog simulation method, investigations have been carried out into the heat and mass transfer in a phytotron and the air conditioning equipment serving it. The heat and water vapour transfer processes are simulated by means of analog network and computing circuits. At the nodes for the wet surfaces (leaves, cooling coils, humidifier) the network for the heat transport influences the network for the vapour transport through t-p converters. At these same nodes an opposite interaction occurs by the evaporation or condensation heat fluxes. The purpose of these investigations is the analysis of the stationary and dynamic behaviour of the climate room and the installation, under various circumstances related to the radiation level and day-night cycles, the (rather large) ranges of air temperature and humidity, and to the air conditioning systems being considered. Of interest are the performance of the various control systems in relation to the temperature and humidity fluctuations in the climate room, the difference in leaf temperature and the energy requirements of the air conditioning equipment.

Inleiding

Bij het onderzoek met planten wordt gebruik gemaakt van milieu's die grotendeels of geheel kunstmatig tot stand gebracht worden. Zo'n kunstmatig milieu kan gerealiseerd worden in klimaatkamers waarin licht en andere milieufactoren geconditioneerd zijn.

Een samenstel van klimaatruimten, waarin een reeks verschillend geconditioneerde milieu's kan worden gerealiseerd wordt een fytotron genoemd [1].

Fytotrons kunnen worden gebruikt voor de studie

van de invloed van milieufactoren op het gedrag van planten en voor het opkweken van planten met reproduceerbare eigenschappen.

Milieufactoren die in fytotrons geconditioneerd kunnen worden zijn, naast licht, de luchttemperatuur, de luchtvochtigheid, het CO₂-gehalte, de luchtsnelheid en de temperatuur van het wortelmilieu [2, 3, 4]. Beschouwt men de fytotrons die in de afgelopen twintig jaar voor het landbouwkundig onderzoek gebouwd zijn, dan ziet men dat een uitgebreid assortiment luchtbehandelingsin-

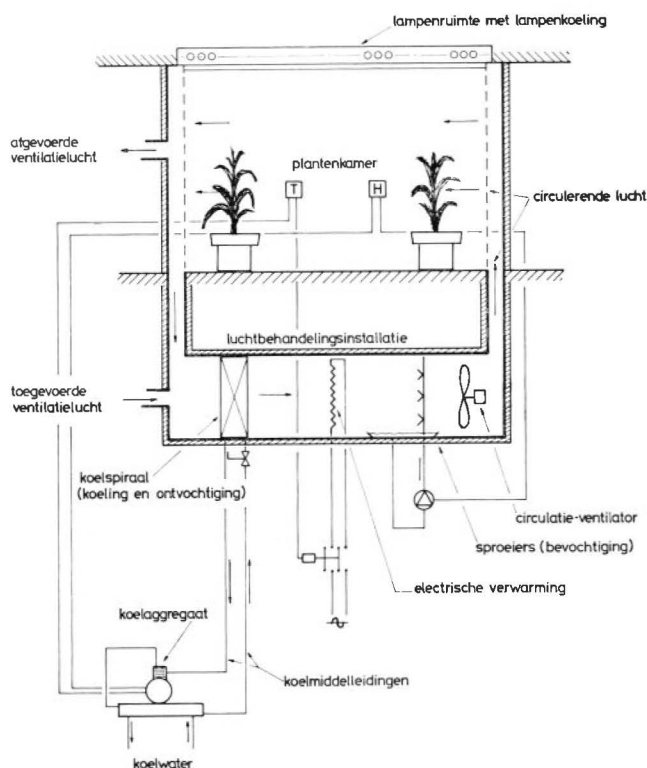


Fig. 1. Schematische voorstelling van een klimaatkamer met een luchtbehandelingssysteem met koeling door directe verdamping.

stallaties toegepast is om, technisch gesproken, min of meer gelijklopende klimaateisen te realiseren [5]. Deze klimaateisen omvatten veelal de mogelijkheid dat de luchttemperatuur en de luchtvochtigheid in de kamer over vrij grote bereiken (bijvoorbeeld de temperatuur van 5°C tot 35°C en de vochtigheid van 30% tot 90%) instelbaar zijn en dat de ingestelde waarden binnen een zekere nauwkeurigheid (bijvoorbeeld + of - 0,5°C en + of - 5%) constant gehouden worden. Ook dienen de luchttemperatuur en de luchtvochtigheid en bij voorkeur ook de luchtbeweging door de gehele kamer heen een zekere uniformiteit te bezitten. De warmtebelasting van een klimaatkamer kan aanzienlijk zijn. De belasting wordt voor een groot gedeelte gevormd door de belichting, welke waarden van 1 tot 3 kW per m² vloeroppervlak of meer kan bezitten. De in de kamer invallende kortgolvlige straling (0,2 tot 0,6 kW/m²) wordt omgezet in zowel voelbare warmte als latente warmte. Deze latente warmte ontstaat als gevolg van waterdampproductie door transpirerende planten. De luchtbehandelingsinstallatie dient er voor te zorgen dat de gewenste condities in de kamer gehandhaafd blijven bij dagcondities (belichting aan) en nachtcondities (belichting uit). De ingestelde luchttemperatuur en luchtvochtigheid kunnen gedurende de dagperiode verschillen van die van de nachtperiode. Gedurende de, vaak toegepaste abrupte, over-

schakeling van dag- naar nachtcondities treden in de installatie aanzienlijke belastingverschillen op.

Een veel gebruikt luchtbehandelingssysteem, dat in het vervolg nog ter sprake zal komen, is schematisch weergegeven in figuur 1.

Bij de gebouwde installaties is de uitleg bepaald door het inzicht van de ontwerper hoe het programma van eisen technisch verwezenlijkt kon worden. Hierbij zij vermeld dat het programma van eisen niet altijd scherp te formuleren bleek. Ook nu nog stuit de vertaling van een biologisch programma van wensen in een technisch programma van eisen, waarop de installatie ontworpen moet worden, op moeilijkheden.

Voor het ontwerpen van fytotrons zijn nog niet voldoende gegevens beschikbaar om uit het beschikbare scala van mogelijk toe te passen systemen die installatie te kiezen die voldoet aan het programma van eisen met een minimum aan kosten, met een gemakkelijke bediening en met geringe storingskansen. Teneinde deze leemte op te vullen heeft de Commissie Fytotrons TNO van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek een programma geactiveerd voor het doen verrichten van berekeningen waarvan de uitkomsten gebruikt kunnen worden voor het ontwerpen en bouwen van fytotrons. Dit artikel beoogt aan de hand van een uitvoerige beschrijving een niet warmtetechnische lezerskring een uiteenzetting te verschaffen van de gevolgde rekenwijze waarbij gedemonstreerd wordt hoe door middel van analoge berekeningen te ontwerpen installaties diepgaand geanalyseerd kunnen worden en waarbij de mogelijkheden worden geïllustreerd die de gevolgde werkwijze biedt. Na een beschrijving van de simulatiemethode zullen de resultaten worden gegeven van een luchtbehandelingssysteem met directe verdamping toegepast bij een klimaatkamer met een vloeroppervlakte van 3 m × 3 m.

Doel van de berekeningen

Ontwerpers en gebruikers zouden ten eerste gediend zijn met de uitkomsten van een studie met als doelstellingen:

- de eigenschappen van verschillende regelsystemen na te gaan met het oog op de vereiste of toegestane fluctuaties in de luchttemperatuur resp. -vochtigheid, en te komen tot een zo eenvoudig mogelijk systeem;
- een economisch optimale keuze en combinatie te vinden van de benodigde klimatiseringsorganen, waaronder de regelorganen, de verwarmers, de koelers, de bevochtigers, de ontvochtigers, de compressoren en de opnemers;
- een voorspelling te doen over de luchttemperaturen en de wandtemperaturen die in een klimaatcel zullen optreden, afhankelijk van be-

straling en luchtverversing, bij dag- en nacht-regeling.

Op voorstel van de Commissie Fytotrons TNO heeft de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek de Technisch Fysische Dienst TNO-TH(TPD) opdracht verstrekt in samenwerking met de Technische en Fysische Dienst voor de Landbouw de bovengenoemde studie uit te voeren. Na een afweging van de verschillende mogelijke berekeningswijzen heeft de TPD een analoge simulatiemethode gekozen om een antwoord op de gestelde problematiek op te kunnen stellen.

Analoge simulatie van in fytotrons optredende warmte- en waterdamptransporten

Bij de gekozen analoge simulatiemethode wordt gebruik gemaakt van elektrische netwerken waarmee de klimaatkamer en de installatie worden nagebootst. De simulatie is gebaseerd op de overeenkomst tussen de vergelijkingen waarmee de verschillende warmte- en waterdamptransportverschijnselen zijn te beschrijven en de vergelijkingen die gelden voor de analoge elektrische netwerken. Analoge grootheden zijn daarbij:

temperatuur	↔ elektrische potentiaal
dampspanning	↔ elektrische potentiaal
warmteweerstand	↔ elektrische weerstand
warmteoverdrachtweerstand	↔ elektrische weerstand
stofoverdrachtweerstand	↔ elektrische weerstand
warmtecapaciteit	↔ elektrische capaciteit
warmtestroom	↔ elektrische stroom
waterdampstroom	↔ elektrische stroom

De warmte- en waterdamptransportprocessen, voorkomend in een klimaatkamer en in de daarbij behorende luchtbehandelingsinstallatie, die gesimuleerd moeten worden, zijn: warmtegeleiding, warmtestraling en warmte- en waterdamptransport tussen droge of natte oppervlakken en de daarlangs stromende lucht. Gecombineerd warmte- en waterdamptransport komt voor bij bladoppervlakken, luchtbevochtigers en luchtkoelers.

In de navolgende paragrafen worden de te onderscheiden transportverschijnselen besproken waarbij speciaal bij de warmtegeleiding op de analogie tussen warmtetransport en de overeenkomstige elektrische verschijnselen nader wordt ingegaan.

De in de afbeeldingen gegeven uitdrukkingen voor de weerstanden en capaciteiten zijn alle duidelijkheidshalve in thermische grootheden opgegeven en behoeven voor hun uiteindelijke waardebepaling voor toepassing in de netwerken slechts omgerekend te worden met de hier van toepassing zijnde schaafactoren voor de tijd, spanning (temperatuur, dampspanning) en stroom (warmte-, waterdampstroom).

In de waarden van de weerstanden en capaciteiten die voorkomen in de netwerken zijn de oppervlakten, waardoor de transporten plaatsvinden, verdisconteerd.

Warmtegeleiding

Voor de warmtegeleiding in vlakke wanden gelden, indien geen warmtebronnen aanwezig zijn en de thermische eigenschappen λ , ρ en c onafhankelijk van de temperatuur en de plaats zijn, de volgende vergelijkingen:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= -\lambda A \frac{\delta T}{\delta x} & (1a) \\ \frac{\delta \Phi}{\delta x} &= -\rho c A \frac{\delta T}{\delta t} & (1b) \end{aligned} \right\} \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (1)$$

Hierin is T de temperatuur, Φ de warmtestroom, x de plaats, t de tijd, λ de warmtegeleidingscoëfficiënt, ρ de dichtheid, c de soortelijke warmte en A de oppervlakte.

In de stationaire toestand is de warmtestroom Φ in de gehele wand gelijk. Bij een wanddikte d bedraagt deze

$$\Phi = \frac{\lambda}{d} A (T_1 - T_2) \quad (2)$$

waarin T_1 en T_2 de beide oppervlaktetemperaturen zijn.

Vergelijking (2) zegt dat de warmtestroom recht evenredig is met het temperatuurverschil over de wand. Dezelfde evenredigheid geldt voor de stroom en de spanning bij een elektrische weerstand. Hierdoor is het mogelijk stationair warmtegeleidingstransport, en ook ander warmtetransport waarvoor de evenredigheid tussen warmtestroom en temperatuurverschil geldt, na te bootsen m.b.v. elektrische weerstanden. Voor alleen stationair ééndimensionaal transport heeft deze methode geen zin omdat dit transport eenvoudig kan worden berekend.

Bij niet-stationaire geleiding in wanden, waarvoor (1) geldt, is het berekenen van de optredende temperaturen en warmtestromen niet meer zo eenvoudig, zeker als de wand uit verschillende lagen is opgebouwd en de condities willekeurig in de tijd verlopen. In dat geval kan het gebruik van een elektrisch analoog model een aanzienlijke vereenvoudiging betekenen. Het model moet dan echter zo zijn opgebouwd dat de vergelijking voor de elektrische geleiding overeenkomt met vergelijking (1). Dit is het geval bij een continu geleidend medium met gelijkmatig verdeelde weerstand en capaciteit, zoals bijv. te realiseren is m.b.v. elektrisch geleidend papier dat met de niet-geleidende zijde of via een dun isolerend laagje, op een zeer goed geleidende plaat wordt gedrukt. Een dergelijk mo-

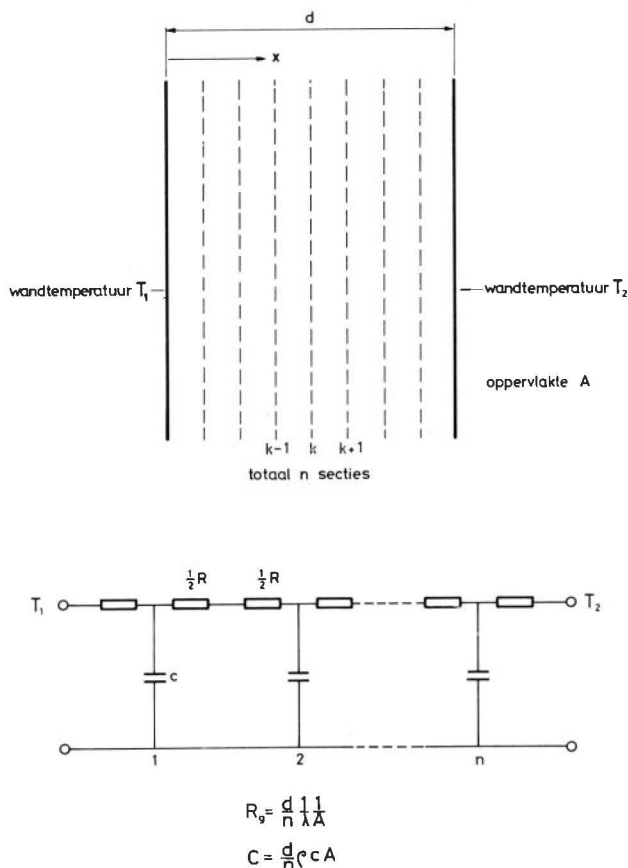


Fig. 2. Gediscretiseerd model voor niet-stationaire warmtegeleiding in een homogene wand met oppervlak $A \text{ m}^2$.

del heeft echter qua weerstand en capaciteit te weinig variatiemogelijkheden.

Veel beter bruikbaar zijn de vaak toegepaste elektrische netwerken opgebouwd uit afzonderlijke in serie staande weerstanden en parallel staande capaciteiten. Wel wordt daarbij een benadering ingevoerd doordat de wanden in segmenten worden verdeeld gedacht (figuur 2). Deze onderverdeling kan men echter meestal zo maken dat voldoende nauwkeurigheid wordt bereikt. De vergelijking voor de geleiding luidt door deze discretisatie naar

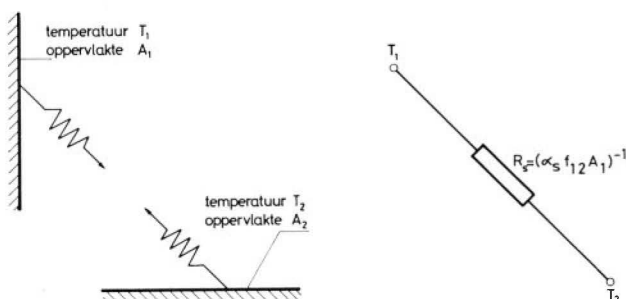


Fig. 3. Analooeg netwerk voor de warmteoverdracht door straling.

de plaats, als volgt (wederom in de thermische symbolen):

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{\lambda}{\rho c} \left[\frac{1}{(\Delta x)^2} (T_{k-1} - T_k) - \frac{1}{(\Delta x)^2} (T_k - T_{k+1}) \right] \quad (3)$$

De netwerkweerstand en capaciteiten zijn af te leiden uit de uitdrukkingen voor de thermische weerstanden en capaciteiten (zie figuur 2), onder invoering van schaalfactoren voor de tijd (thermisch/electrisch), de temperatuur (spanning) en de warmtestroom (elektrische stroom).

Deze kunnen vrij worden gekozen, waardoor men gemakkelijk realiseerbare waarden kan nemen. Zo is het mogelijk de tijd sterk te reduceren, bijv. 1 uur thermisch $\rightarrow$ 1 seconde elektrisch of 1 ms elektrisch [6, 7].

Volgens dit principe kunnen ook combinaties van wanden, zoals bij vertrekken, in model worden gebracht. Daarbij moet eveneens de warmteoverdracht door convectie bij de wandoppervlakken, de stralingsuitwisseling tussen de verschillende wandoppervlakken en het warmtetransport door de ventilatie worden nagebootst, zoals in het nu volgende zal worden verduidelijkt.

Warmtestraling

De warmteuitwisseling door straling tussen twee oppervlakken met temperaturen T_1 en T_2 en oppervlakten A_1 en A_2 (figuur 3) kan, indien deze oppervlakken de opvallende straling geheel absorberen, worden voorgesteld door

$$\Phi_s = \alpha_s f_{12} A_1 (T_1 - T_2) \quad (4)$$

waarin

$$\alpha_s = 5,77 \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$$

en f_{12} de vormfactor voorstelt voor warmteoverdracht door straling van oppervlak 1 naar oppervlak 2. De vormfactor wordt bepaald door de grootte en de onderlinge ligging van de beide oppervlakken. Het analoog netwerk bestaat uit een weerstand waarvan de grootte bepaald wordt door de coëfficiënt uit (4).

Advectief warmte- en waterdamptransport

Wanneer met een luchtstroom warmte en waterdamp van een ruimte 1 naar een ruimte 2 worden getransporteerd, dan zijn, als de temperatuur en de dampspanning in elk van de ruimtes uniform worden verondersteld, de getransporteerde hoeveelheden warmte- en waterdamp

$$\Phi_a = \rho c_p q_v (T_1 - T_2) \quad (5)$$

$$q_a = \frac{M q_v}{RT} (p_1 - p_2) \quad (6)$$

waarin q_v het luchtdebiet en tevens het water-

dampdebiet is, en waarin M de molaire massa van water, R de molaire gasconstante en T de waterdamp temperatuur voorstellen.

De analoge netwerken zijn weergegeven in fig. 4. Omdat het transport slechts in de stromingsrichting van de lucht kan optreden dienen in de netwerken „spanningsvolgers” opgenomen te worden. Deze zorgen ervoor dat bij de knooppunten voor T_2 en p_2 de stromen Φ_a en q_a volgens (5) en (6) toegevoerd of onttrokken worden zonder dat daarbij T_1 en p_1 beïnvloed worden.

Convectief warmte- en waterdamptransport

De convectieve warmteoverdracht (Φ_c) tussen een oppervlak met een uniforme temperatuur T_w en de aangrenzende lucht met een uniforme temperatuur T_1 kan worden voorgesteld door

$$\Phi_c = \alpha_c A (T_w - T_1) \quad (7)$$

waarin α_c de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie is en A de wandoppervlakte.

Het analoge netwerk bestaat uit een weerstand tussen de knooppunten voor T_w en T_1 (figuur 5), waarbij de weerstandswaarde correspondeert met de thermische weerstand ter grootte van $(\alpha_c A)^{-1}$.

Bij een nat oppervlak kan ook waterdamptransport optreden. Dit transport kan worden beschreven door

$$q_c = \frac{M\beta}{RT} A (p_w - p_1) \quad (8)$$

Hierin is p_w de dampspanning aan het oppervlak. Voor de stofoverdrachtscoëfficiënt β geldt, op grond van de analogie tussen convectieve warmte- en stofoverdracht

$$\beta = \frac{\alpha_c}{\rho c_p Le^k} \quad (9)$$

waarin Le het kengetal van Lewis is.

In de literatuur wordt voor k de waarde 0,48 aanbevolen voor vrije convectie en 0,67 voor gedwongen convectie [8].

Het netwerk voor deze convectieve stofoverdracht is eveneens weergegeven in figuur 5.

Bij het nabootsen van warmteoverdracht en verdamping bij bladeren van planten dient rekening te worden gehouden met de om en in de bladeren optredende weerstanden [9].

Bij verwaarlozing van fotosynthese-effecten kan voor een blad een warmtebalans opgesteld worden waarin tot uitdrukking komt dat de per tijdseenheid aan het blad toegevoerde energie gelijk is aan de som van de per tijdseenheid van het blad weggevoerde energie en de verandering van de warmte-inhoud van het blad. De energie kan als voelbare warmte aan een blad door straling en, als de lucht-

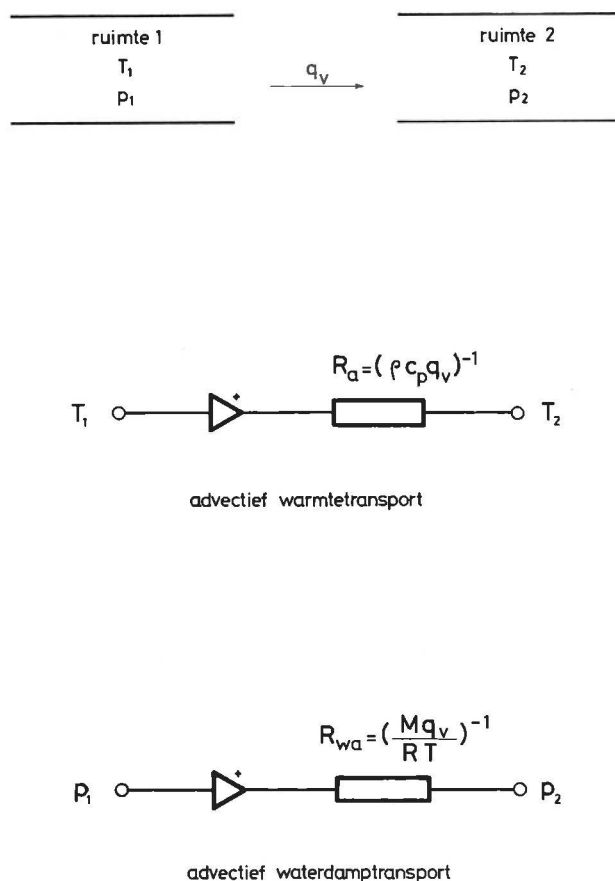


Fig. 4. Analoge netwerken voor advectief warmte- en waterdamptransport.

temperatuur hoger is dan de bladtemperatuur, door convectie worden toegevoerd. Energie kan door een blad als voelbare warmte worden afgegeven door straling naar de omgeving en door convectie, als de luchttemperatuur lager is dan de bladtemperatuur, en als latente warmte door het verdampen van water uit het blad via huidmondjes (transpiratie). De voor de transpiratie benodigde verdampingswarmte speelt een rol in de warmtebalans.

De voelbare warmteuitwisseling tussen een blad en zijn omgeving wordt belemmerd door weerstanden

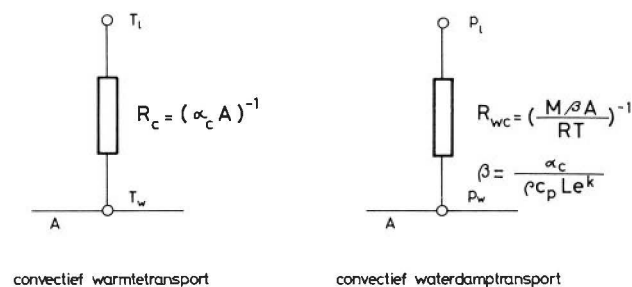


Fig. 5. Analoge netwerken voor convectief warmte- en waterdamptransport.

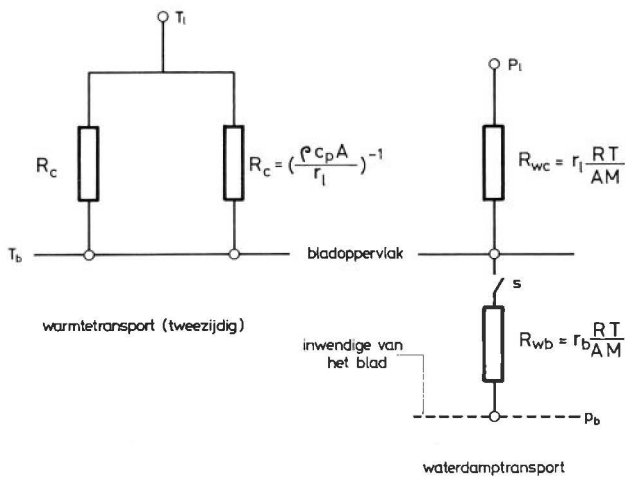


Fig. 6. Analoge netwerken voor warmte- en waterdamptransport tussen blad en lucht.

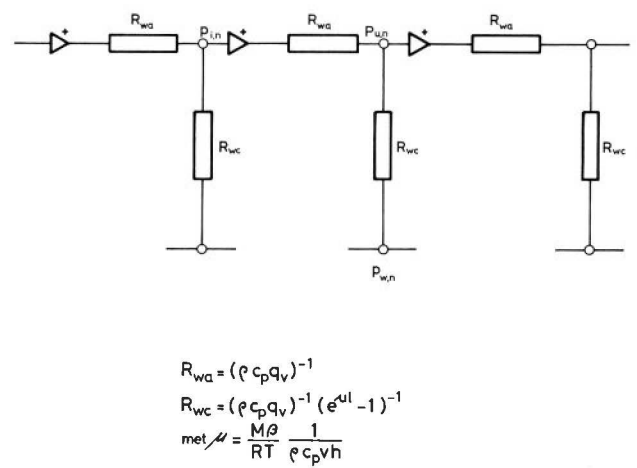


Fig. 8. Waterdamptransport tussen een oppervlak en langsstromende lucht.

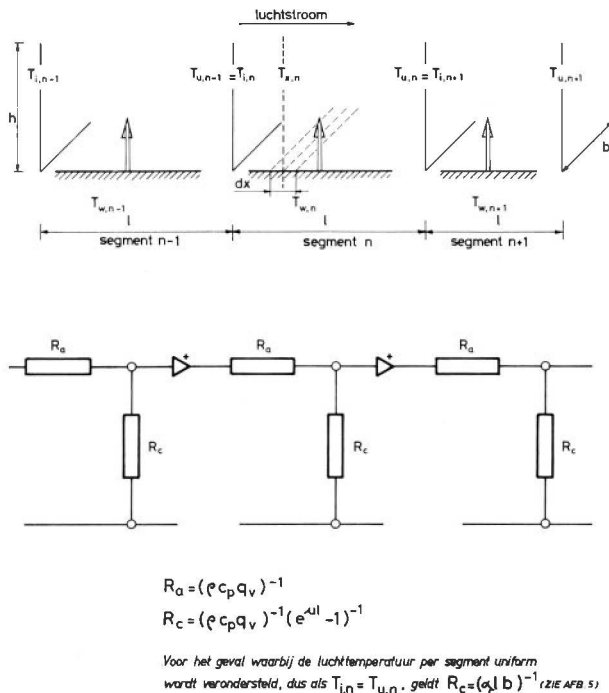


Fig. 7. Warmteoverdracht tussen een wand en langsstromende lucht voor een aantal opeenvolgende segmenten.

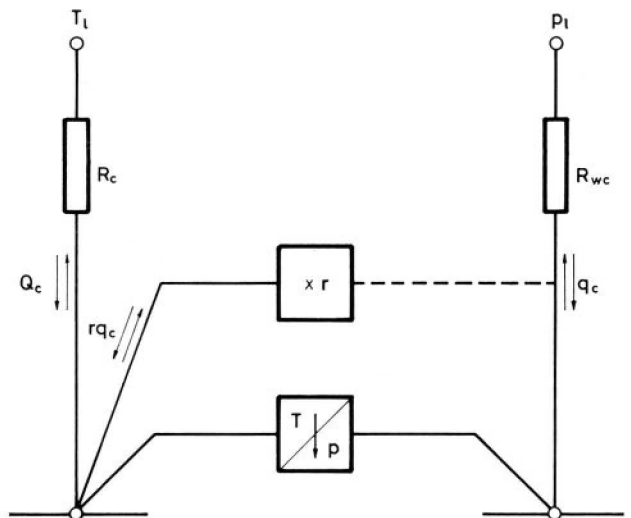


Fig. 9. Koppeling van het thermische en het hygrische netwerk bij plaatsen waar warmte- en stofoverdracht beide optreden.

zoals hiervoor bij straling en convectie is beschreven. Het waterdamptransport wordt belemmerd door de convectieweerstand tussen blad en lucht en door de interne bladweerstand die in het blad door de huidmondjes gevormd wordt.

Voor het hier beschreven onderzoek kon het interne en externe waterdamptransport van een blad naar de omringende lucht worden voorgesteld door

$$q_c = \frac{1}{r_l + r_b} \frac{MA}{RT} (p_b - p_l) \quad (10)$$

Hierin is r_b de bladweerstand en r_l de convectieve weerstand zoals deze veelal gebruikt worden in de fysiologische literatuur (daar uitgedrukt in s/cm) en A de grootte van het bladoppervlak (enkelzijdig). De netwerken voor dit warmte- en waterdamptransport zijn weergegeven in figuur 6. Tijdens de periode waarin in de kamer planten worden belicht is voor R_{wb} een zekere ingestelde waarde genomen. Door middel van schakelaar s wordt de weerstand tegen verdamping bij het uitschakelen van de belichting oneindig groot gemaakt zodat 's nachts geen transpiratie optreedt¹⁾.

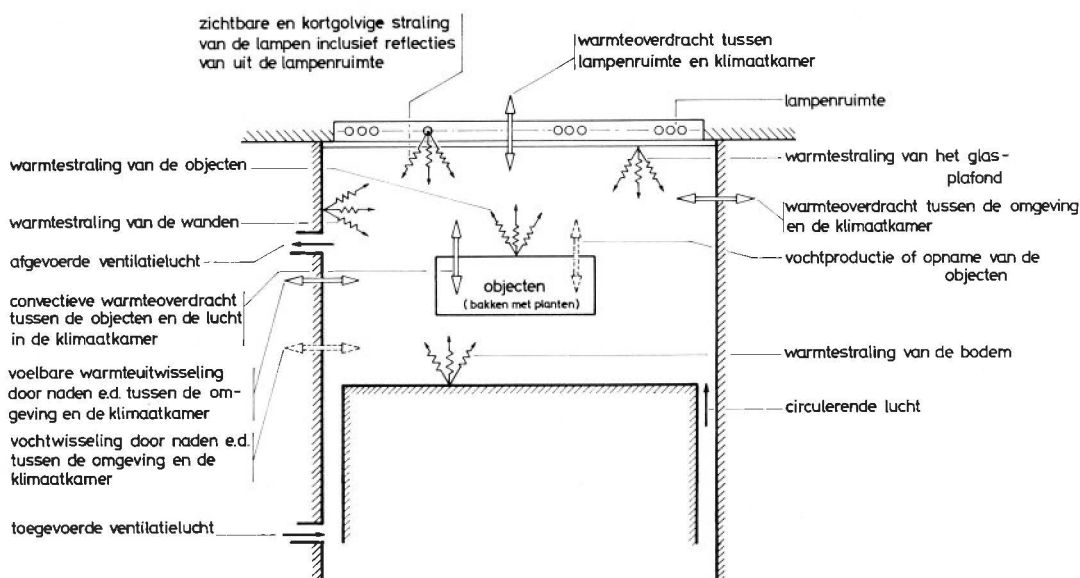


Fig. 10. Schematische voorstelling van de warmteuitwisseling in een klimaatkamer.

Warmte- en waterdamptransport tussen een oppervlak en langsgestroomde lucht

Figuur 7 toont een luchtstroom met snelheid v , hoogte h en breedte b , langs een in segmenten verdeelde wand, segmentlengte l , waarin per segment de wandtemperatuur $T_{w,n}$ uniform verondersteld is. Het verband tussen de luchtintredetemperatuur $T_{i,n}$ en de luchtuitredetemperatuur $T_{u,n}$ van een segment volgt door integratie van de volgende vergelijking, voorstellend de warmtebalans van de lucht op een klein gebied ter lengte dx en breedte b waar de luchttemperatuur $T_{x,n}$ is:

$$\alpha_c b dx (T_{w,n} - T_{x,n}) = \rho c_p h b v dT_{x,n} \quad (11)$$

waaruit volgt

$$T_{x,n} = T_{w,n} - (T_{w,n} - T_{i,n}) e^{-\mu x} \quad (12)$$

$$\text{met} \quad \mu = \frac{\alpha_c}{\rho c_p v h} \quad (13)$$

Substitutie van $x = l$ geeft

$$T_{u,n} = T_{w,n} - (T_{w,n} - T_{i,n}) e^{-\mu l} \quad (14)$$

De warmtestroom die aan het wandoppervlak $l.b$ wordt overgedragen is te schrijven als

$$\Phi_c = \rho c_p q_v (1 - e^{-\mu l}) (T_{w,n} - T_{i,n}) \quad (15)$$

waarin $q_v = v h b$ het luchtdebiet voorstelt. De hieruit af te leiden weerstanden, voor het analoge netwerk zijn aangegeven in figuur 7. In het analoge netwerk zijn evenals in figuur 4 de segmenten

door een spanningsvolger gescheiden om te voorkomen dat overdracht tegen de stromingsrichting in zou plaatsvinden. Voor waterdamptransport is een soortgelijk netwerk van toepassing met weerstandswaarden zoals aangegeven in figuur 8.

Onderlinge beïnvloeding van warmte- en waterdamptransport

Bij natte oppervlakken treedt zowel warmte- als waterdamptransport op. De thermische en hygrische netwerkmodellen zijn bij de desbetreffende knooppunten met elkaar verbonden, zoals is weergegeven in figuur 9. Deze koppeling wordt enerzijds bepaald door de relatie tussen de temperatuur en de waterdampspanning (verzadigde dampspanningslijn), anderzijds door de bij verdamping respectievelijk condensatie optredende warmte toe- en afvoer. In het analogon gebeurt het omzetten van temperaturen in dampspanningen met functiegeneratoren (T - p omzetter).

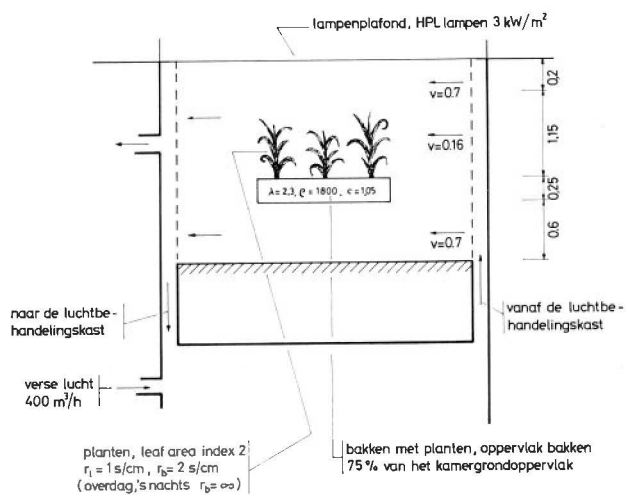
De optredende „waterdampstromen” q_e worden in het hygrische netwerk gemeten en als „warmtestromen” r_{q_e} aan het thermische netwerk toegevoerd.

Simulatie van de klimaatkamer

De in een fyto-tronkamer optredende warmte- of stofoverdrachtprocessen zijn schematisch voorgesteld in figuur 10. Deze processen zijn in het analogon nagebootst volgens de hiervoor gegeven regels.

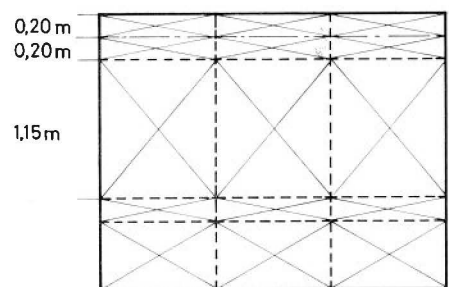
Enkele gegevens van de gesimuleerde opstelling zijn vermeld in figuur 11. Ten aanzien van de instraling wordt opgemerkt dat slechts een gedeelte van het geïnstalleerde lampvermogen de kamer

¹⁾ De auteurs zijn Dr. Ir. P. Gaastra, Centrum voor Plantenfysiologisch Onderzoek Wageningen, zeer erkentelijk voor het verstrekken van fysiologische gegevens over belichting en transpiratie.

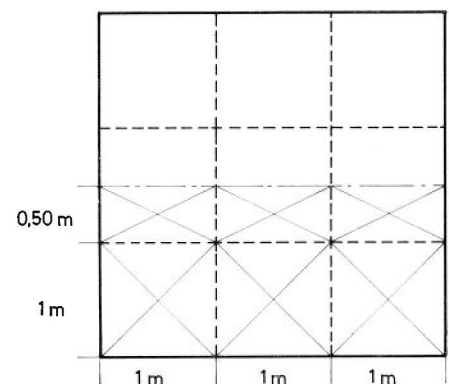


kamerafmetingen: 3 x 3 x 2,2 m
 luchtdebiet klimaatkamer: 8000 m³/h
 instraling in de kamer, onder het glasplafond
 0,15 x 3 kW/m²
 geabsorbeerde fractie van het geïnstalleerde
 belichtingsvermogen in bladoppervlak: I
 I = absorptiefactor x geometrische factor x 0,15 x 9 x 3 =
 0,8 x 0,6 x 0,15 x 27 kW = 1,95 kW

Fig. 11. Gesimuleerde opstelling.



verticale doorsnede evenwijdig de richting van de luchtstroom



horizontale doorsnede

Fig. 13. Toegepaste segmentering klimaatkamer.

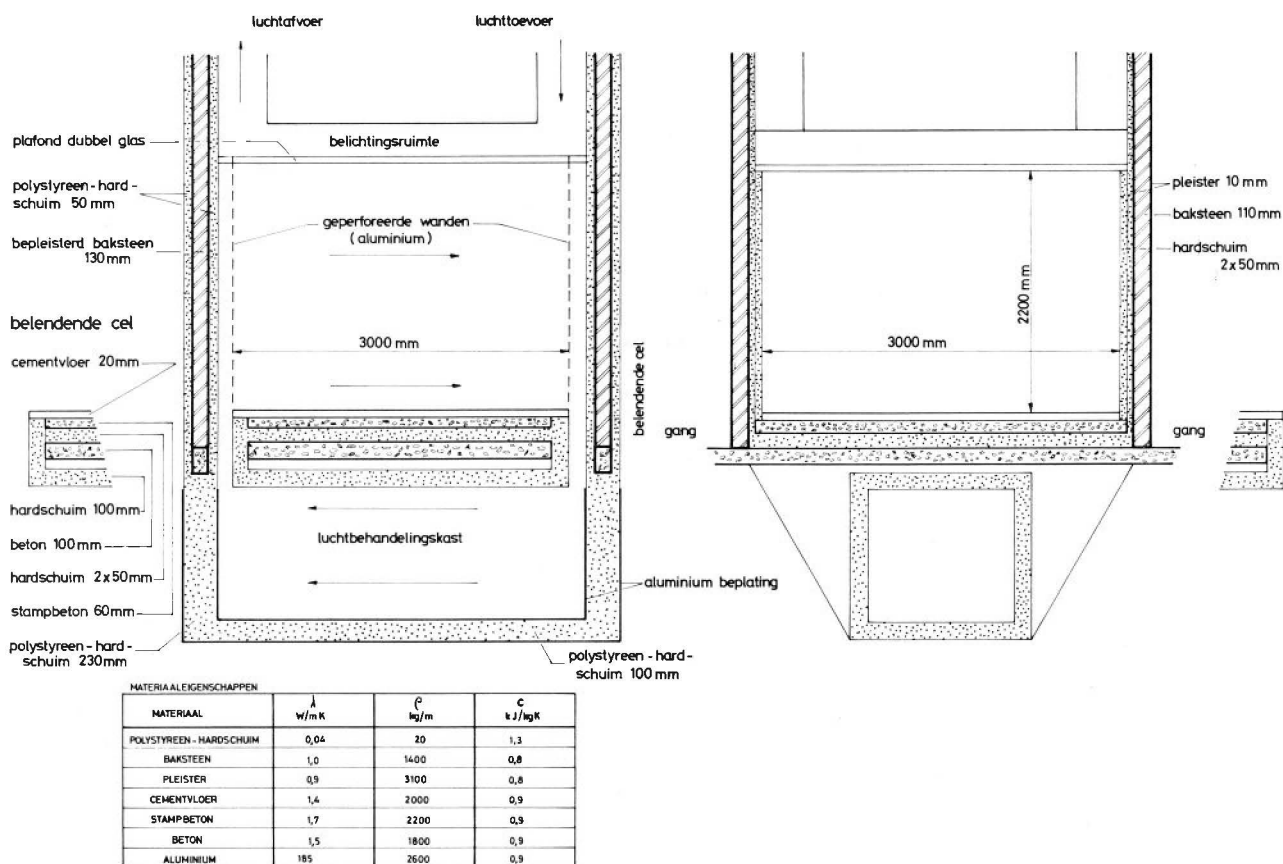


Fig. 12. De opbouw van de gesimuleerde klimaatkamer.

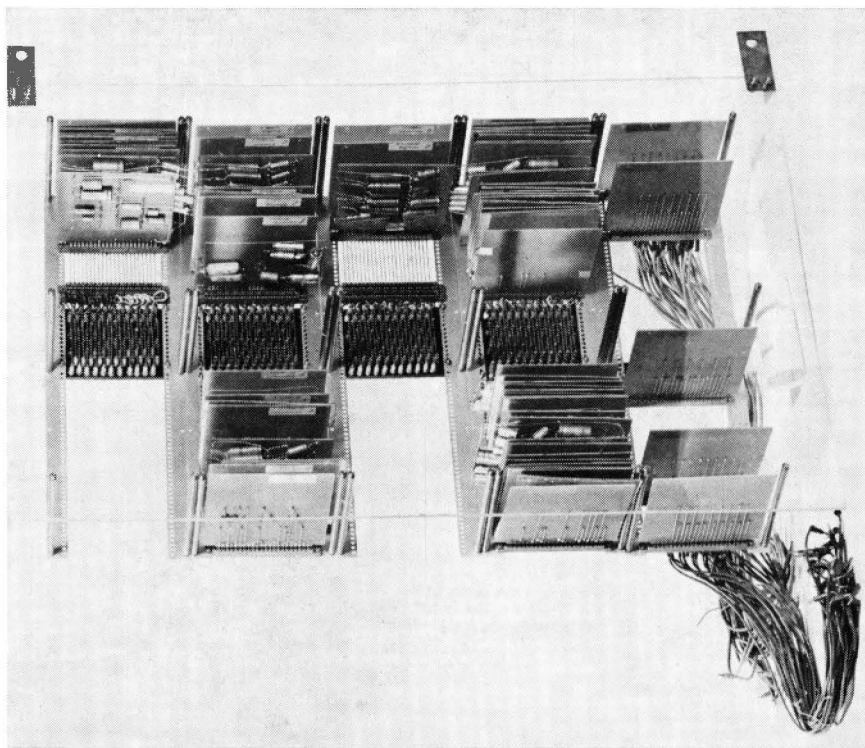


Fig. 14. Het netwerkmodel voor het warmte- en watertransport in de fytotronkamer.

binnentreedt. Oorzaken hiervoor zijn het lichtrendement van de lampen en de reflecties en absorpties van de straling in de lampenruimte en in het glasplafond. De binnentredende fractie bedraagt hier 0,15 van het geïnstalleerde lampvermogen.

De opbouw van de gesimuleerde klimaatkamer is getekend in figuur 12. Voor de analoge simulatie is de kamer verdeeld in een aantal segmenten (zie figuur 13). De onderverdeling in segmenten houdt

in dat de lucht- en oppervlaktetemperaturen per segment constant worden verondersteld. Het gehele analoon van de kamer is opgebouwd op ruim 50 uitneembare montagekaarten (figuren 14 en 15).

Simulatie van de luchtbehandelingsapparatuur

In deze paragraaf wordt de nabootsing van de luchtbehandelingsapparatuur van het eenvoudige

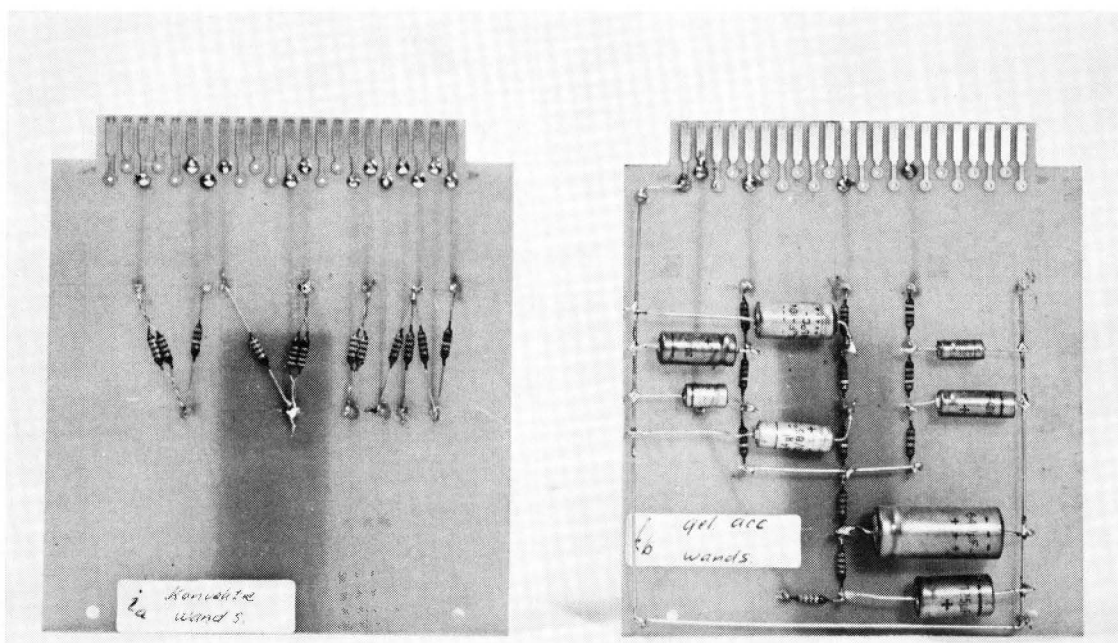


Fig. 15. Enkele montagekaarten met netwerken.

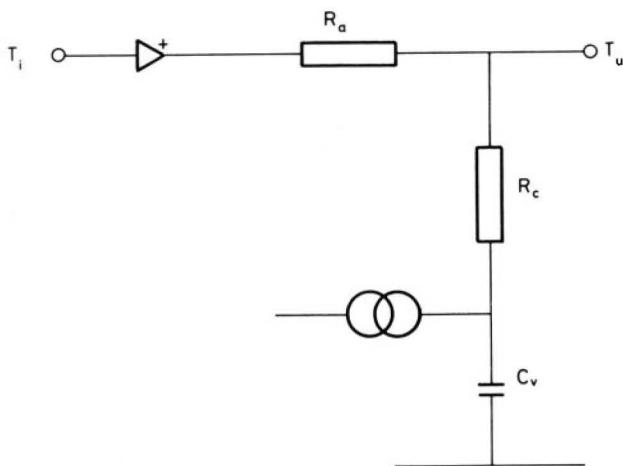


Fig. 16. Analooq netwerk voor een elektrische verwarmers.

systeem volgens figuur 1 besproken. In dit systeem wordt de lucht gekoeld en/of ontvochtigd door een koelspiraal waarin een circulerend koelmiddel verdampt. De voor de verdamping benodigde warmte wordt onttrokken aan de langsstromende lucht. Verwarming vindt plaats met elektrische verwarmers. De lucht kan bevochtigd worden door het versproeien van water. De thermostaat schakelt naar gelang de afwijking van de luchttemperatuur van de ingestelde waarde de koeling en de verwarming aan of uit. De hygrostaat schakelt de koelmachine aan als ontvochtiging gevraagd wordt en sproeiers worden in werking gesteld als bevochtiging gevraagd wordt.

De hierna te bespreken simulatieschema's van de luchtbehandelingsapparatuur zijn bedoeld om de simulatie principieel, veelal in de vorm van passieve netwerken, weer te geven. Bij de realisering van de apparatuur in het analoon is echter veelal gebruik gemaakt van rekenschakelingen werkend met operationele versterkers.

Elektrische verwarmers

De warmteoverdracht van de elektrische verwarmers naar de langsstromende lucht kan worden nagebootst door middel van het schema van figuur 16. De vergelijkingen waarmee deze warmteover-

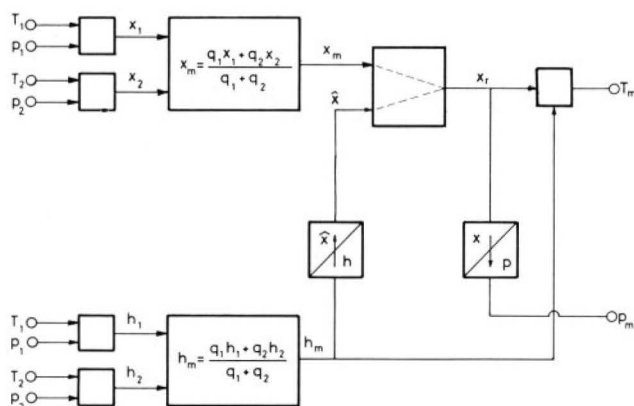


Fig. 17. Het mengen van twee luchtstromen.

dracht kan worden beschreven, zijn af te leiden uit de volgende warmtestroombalansen:

$$\frac{T_i - T_u}{R_a} + \frac{T_v - T_u}{R_c} = 0 \quad (16)$$

$$C_v \frac{dT_v}{dt} = \Phi_v + \frac{T_u - T_v}{R_c} \quad (17)$$

Hierin is T_v de temperatuur en C_v de warmtecapaciteit van het verwarmingslichaam. R_a en R_c kunnen worden bepaald met de formules gegeven in de figuren 4 en 5.

Menging van luchtstromen

Menging van luchtstromen treedt hier op als de gelaagde luchtstromingen in een kamer zich bij het verlaten van de kamer door de geperforeerde afzuigwand mengen en bij het toevoegen van buitenlucht aan het luchtcircuit.

Aangenomen wordt dat de menging ideaal verloopt zodat de uitgaande lucht uniform van temperatuur en dampspanning is. Bij de menging van twee luchthoeveelheden q_1 en q_2 , met temperaturen T_1 en T_2 en dampspanningen p_1 en p_2 zijn de resulterende dampspanningsconcentratie x_m en de gemiddelde enthalpie h_m de gewogen gemiddelden van x_1 , x_2 en h_1 , h_2 zoals aangegeven in figuur 17. De waarden van de uitgaande T_m en p_m kunnen worden afgeleid uit x_m en h_m . De dampspanning p_m echter kan nooit hoger worden dan de verzadigde dampspanning behorend bij het verzadigingsvochtgehalte $\hat{x}$ bij de berekende waarde van h_m . Daarom dient de berekende x_m waarde vergeleken te worden met de $\hat{x}$ waarde behorende bij h_m . De kleinste van deze twee waarden, aangeduid met x_r wordt gebruikt voor de berekening van de mengluchttemperatuur T_m terwijl p_m rechtstreeks uit x_r volgt.

Luchtbevochtiging

Ook voor een luchtbevochtigingssysteem volgens het principe van een luchtwater zoals schetsmatig weergegeven in figuur 18, kan een directe analoge simulatie opgesteld worden. Dit vereist echter een vrij omvangrijk netwerk waardoor er voorsnag de voorkeur aan is gegeven de luchtwater na te bootsen door middel van de analoge rekenschakeling van figuur 18.

De bij deze schakeling toegepaste overgangsfunctie is ontleend aan de literatuur [10]. Verder zij in dit verband verwezen naar [11].

Luchtcooling met directe verdamping

Een vereenvoudigde simulatie van een koelsysteem is weergegeven in figuur 19. De verdampertemperatuur T_v wordt uniform verondersteld en de uit de langsstromende lucht verwijderde voelbare en latente warmte wordt afgevoerd door een koelaggregaat met als capaciteitskromme

$$\Phi_v = n + m T_v \quad (18)$$

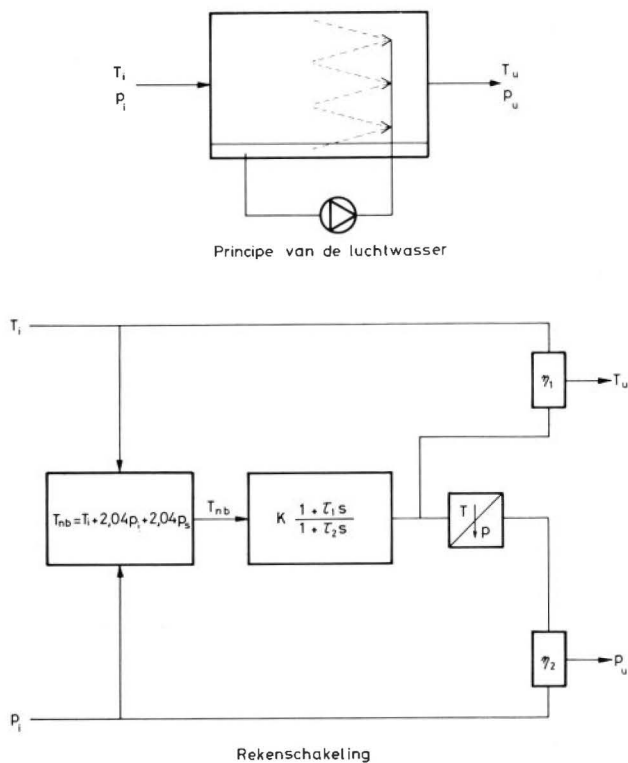


Fig. 18. Analoge rekenschakeling voor de luchtbevochtiger volgens het geschetste principe (T in $^{\circ}\text{C}$, p in mmHg).

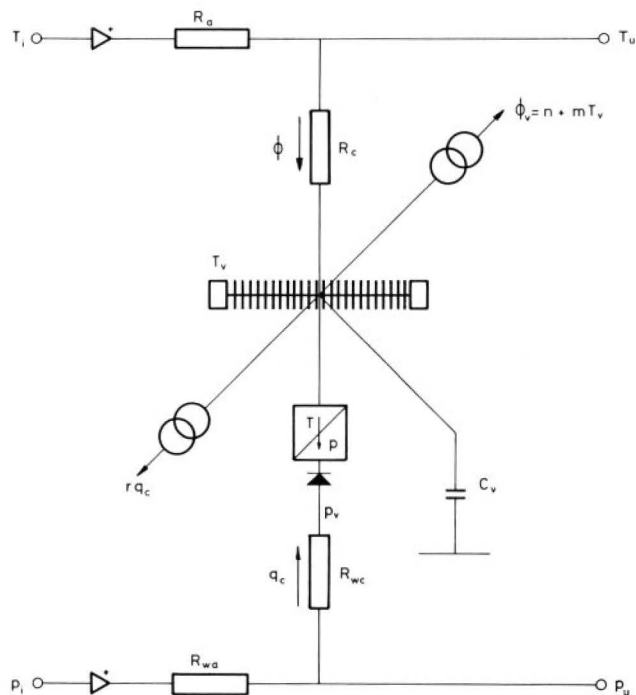


Fig. 19. Vereenvoudigde simulatie van een koelspiraal met directe verdamping. De compressorcapaciteit is $\Phi_v = n + m T_v$.

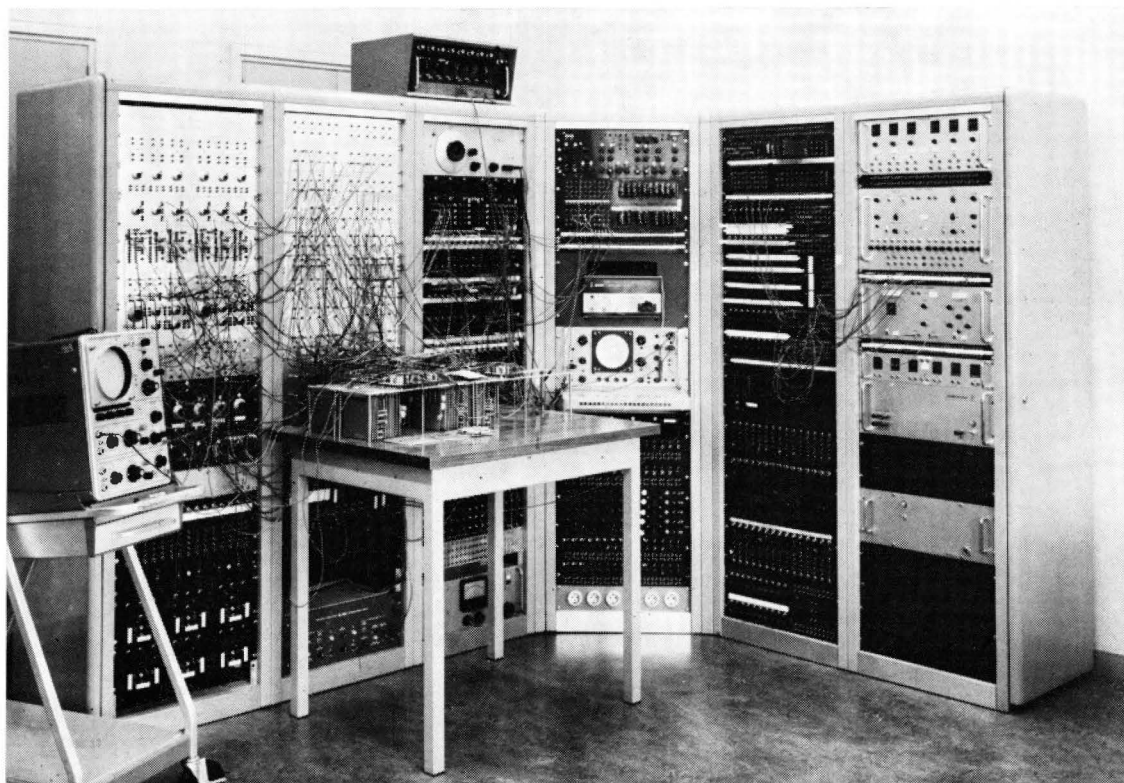


Fig. 20. Het fytotron-analogon.

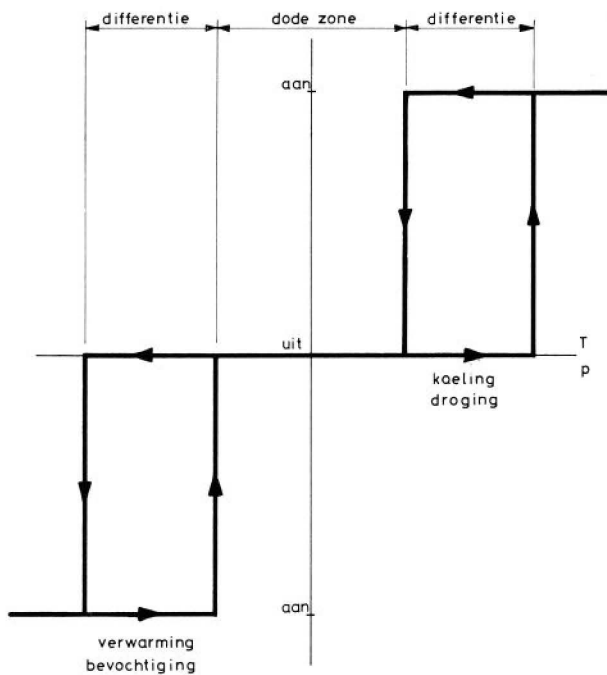


Fig. 21. Thermostatschakeling.

Bij het in- of uitschakelen van het koelaggregaat door de thermostaat of de hygrostaat wordt de warmtestroom Φ_v in- of uitgeschakeld. De van toepassing zijnde stroombalansvergelijkingen zijn hier:

$$\frac{T_i - T_u}{R_a} + \frac{T_v - T_u}{R_c} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{T_u - T_v}{R_c} + r q_c = C_v \frac{dT_v}{dt} + \Phi_v \quad (20)$$

$$q_c = \frac{p_u - p_v}{R_{wc}} \quad (21)$$

$$\frac{p_i - p_u}{R_{wa}} + \frac{p_v - p_u}{R_{wc}} = 0 \quad (22)$$

C_v is de warmtecapaciteit van de verdamper. De waarden van de voorkomende weerstanden R_a en R_c volgen uit de formules genoemd in figuur 7 en de waarden van R_{wa} en R_{wc} uit die van figuur 8.

Het analogon voor de klimaatkamer en de luchtbehandelingsinstallatie

Het complete analogon, bestaande uit de klimaatkamer en de componenten van de luchtbehandelingsinstallatie gesimuleerd zoals hiervoor uiteengezet, is samengebouwd in de in figuur 20 getoonde opstelling. Naast de besproken onderdelen om-

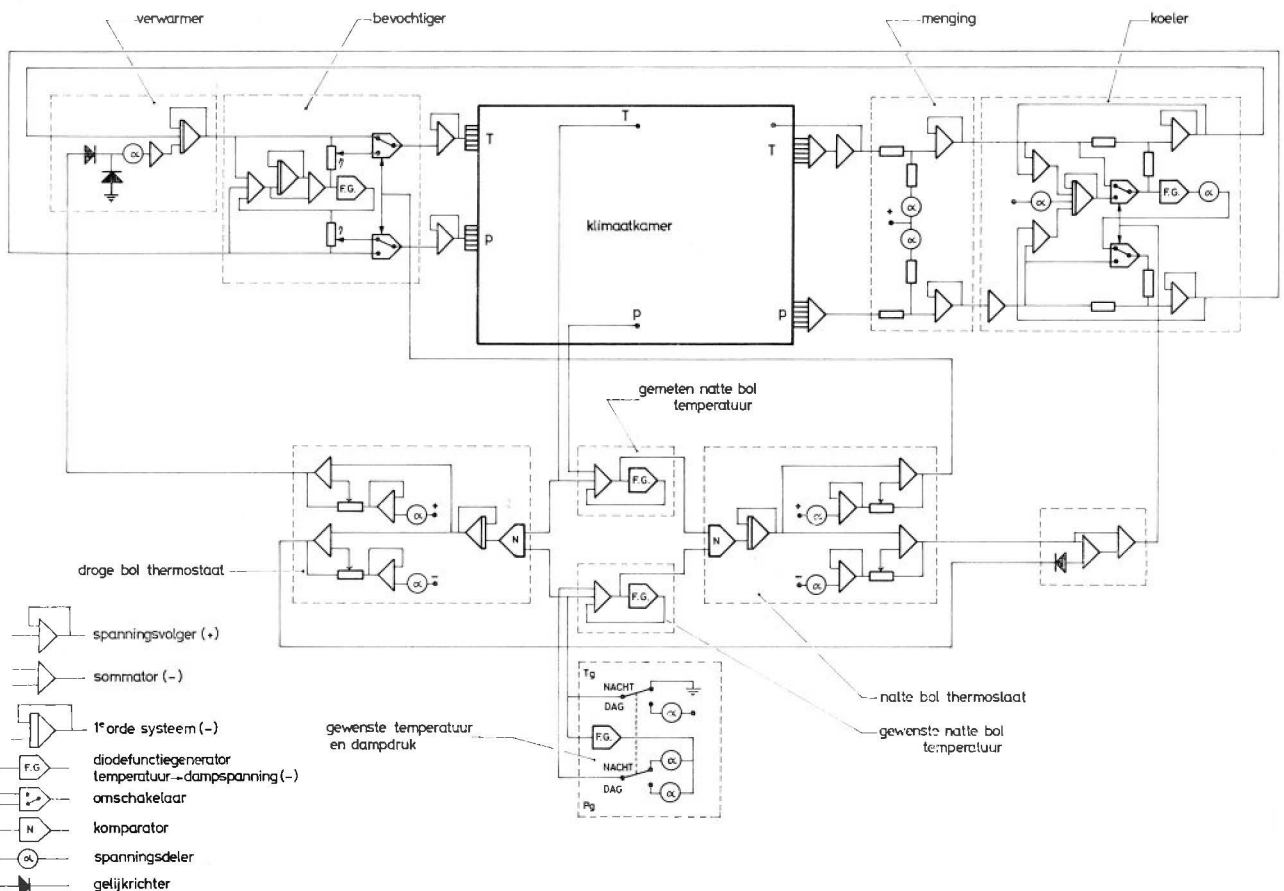


Fig. 22. Toegepast analog schema voor het systeem van fig. 1.

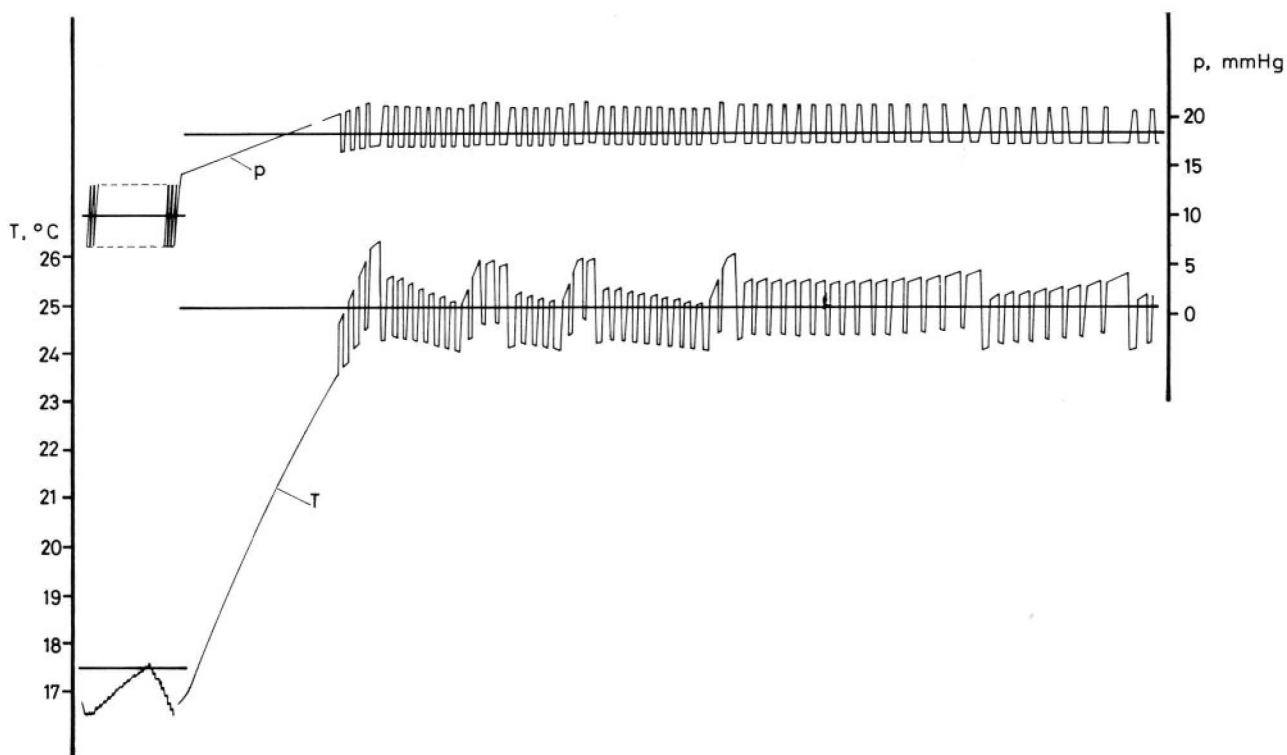


Fig. 23a. Het analoog gemeten temperatuur- en dampspanningsverloop bij een omschakeling van nacht- naar dagcondities.

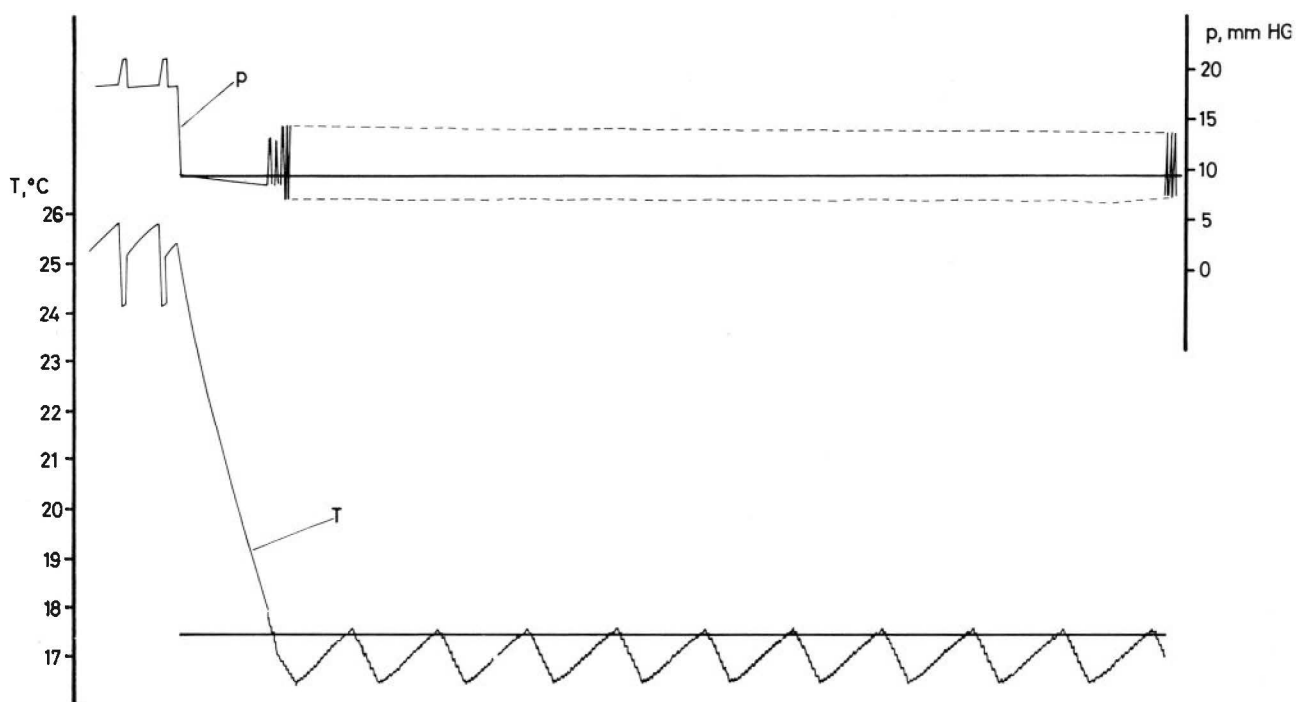


Fig. 23b. Het analoog gemeten temperatuur- en dampspanningsverloop bij een omschakeling van dag- naar nachtcondities.

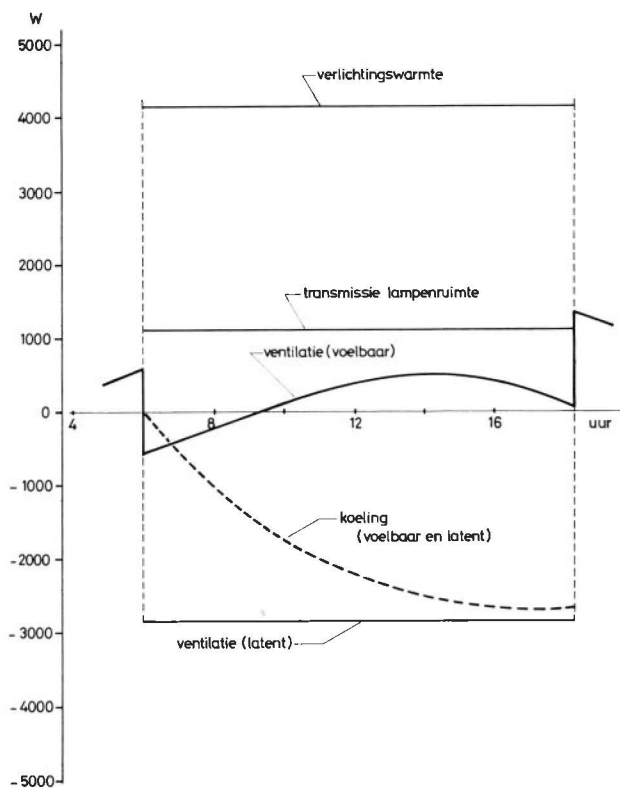


Fig. 24. Toe- en afgevoerde warmtehoeveelheden, voor de beschreven kamer en installatie.

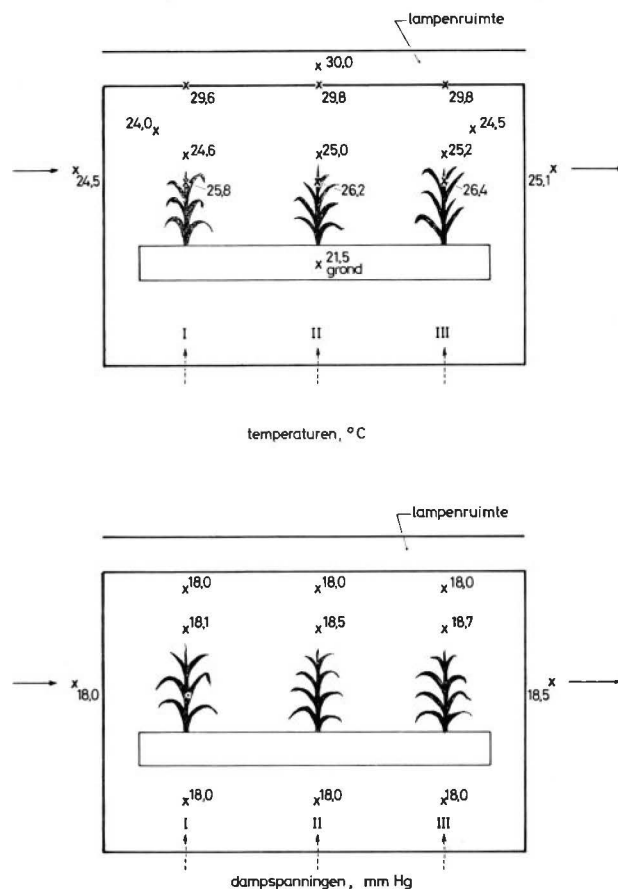


Fig. 25. Temperaturen en dampspanningen in de verticale middensectie optredend 2 uur na het overschakelen van nacht op dag.

vat het analogon onder meer een aantal stroombronnen voor het injecteren van de warmtestromen, veroorzaakt door de belichting.

Bij het model is een aan-uit regeling toegepast door middel van droge- en nattebolthermostaten die schakelen zoals aangegeven is in figuur 21. Ook voor deze thermostaten werden analoge schakelingen ontwikkeld waarop hier niet nader zal worden ingegaan.

De in de installatie optredende looptijden ten gevolge van het luchttransport van het ene naar het andere onderdeel — die niet eenvoudig analoog te simuleren zijn — zijn klein ten opzichte van de tijdconstantes ten gevolge van de thermische traagheden en zijn buiten beschouwing gelaten.

Het volledige blokschema van de gesimuleerde kamer en de installatie is weergegeven in figuur 22, waarin voor de installatie de toegepaste reenschakelingen voor de verschillende luchtbehandelingsprocessen zijn getoond.

De gebruikte tijdschaal is zo gekozen dat een „thermisch” uur in het analogon in een seconde wordt doorlopen.

Voor het registreren van de te meten grootheden werd gebruik gemaakt van een zeskanals uvschrijver.

Berekeningsresultaten

Als illustratie van de verkregen resultaten zijn in figuur 23 een tweetal grafieken van het verloop van de dampspanning en van de temperatuur in de klimaatkamer weergegeven. Naast deze gegevens bevat het oorspronkelijke oscillogram van deze meting de hier niet gereproduceerde gegevens over de verdampertemperatuur en die over de schakeltijden van de verwarmers en bevochtigers.

In de tabel zijn de belangrijkste getalwaarden voor het hier beschouwde geval samengevat. Ze gelden voor de volgende condities: differenties thermostaten $\pm 0,1 \pm 0,5^\circ\text{C}$, tijdconstantes thermostaten 90 s, verwarmingscapaciteit 8,7 kW, bevochtiger tijdconstantes 270 s en 490 s, koeler $\Phi_v = 14,5 + 0,58 T_v$ kW (met T_v $^\circ\text{C}$) en tijdconstante 30 s, sinusvormig verloop van de buitenluchttemperatuur van $25 \pm 5^\circ\text{C}$.

Uit de waarnemingen zijn eveneens enige belangrijke warmtehoeveelheden afgeleid die aan de kamer met installatie werden toegevoerd of onttrokken. Deze zijn in figuur 24 voor de dagperiode als functie van de tijd weergegeven.

Andere resultaten betreffende de temperatuur- en

Tabel

			dag		nacht		
ingestelde temperatuur			25,0		17,5		°C
ingestelde dampspanning			18,6		9,6		mmHg
tijd na omschakeling			1	12	1	12	uur
luchttemperatuur in de kamer	gemiddelde		25,0	25,3	17,1	17,1	°C
	variatie t.g.v.	bevochtiger	1,1	0,9	—	—	°C
		koeler					
		+ bevochtiger	3,0	3,0	—	—	°C
		verwarmer	1,0	—	1,0	1,0	°C
dampspanning in de kamer	gemiddelde		19,0	19,0	10,5	10	mmHg
	variatie t.g.v.	bevochtiger	3,7	3,0	—	—	mmHg
		koeler					
		+ bevochtiger	8,0	11	6,5	6	mmHg
		verwarmer	—	—	0,25	0,25	mmHg
schakeltijden	bevochtiger	aan	1/2	1	—	—	min.
		uit	3/4	4 1/4	—	—	min.
	koeler	aan	1/2	1/2	1/4	1/8	min.
		uit	20	5 1/2	1/4	1/4	min.
	verwarmer	aan	—	—	8	8	min.
		uit	—	—	3	3	min.

dampspanningsverschillen tussen de plant en de omgeving en de ongelijkmatigheden in de temperatuur en in de dampspanning in de kamer. In figuur 25 zijn voor de eerder vermelde omstandigheden de temperaturen en de dampspanningen gegeven die werden gemeten op een tijdstip 2 uur na de omschakeling van de nachttemperatuur van 17,5°C naar de dagtemperatuur van 25°C op de hartlijn van de cel in de secties I, II en III (genummerd in de richting van de luchtstroming).

Over de berekeningen is verslag uitgebracht in een aantal interne rapporten. Deze rapporten kunnen voor geïnteresseerden beschikbaar gesteld worden.

In een volgend artikel zal uitvoeriger worden ingegaan op de verkregen berekeningsresultaten voor verschillende aan-uit geregelde systemen.

Algemene toepassing

Zoals in het voorgaande is aangetoond, is het met de elektrische analoge simulatiemethode zeer goed mogelijk het gedrag van het klimaat in klimaatkamers, waarbij vaak van gecompliceerde regelsystemen sprake is, te voorspellen. Door een toetsing van dit gedrag bij verschillende luchtbehandelings- en regelingsystemen over het gehele gewenste bereik van luchttemperaturen en van lucht-

vochtigheden bij verschillende belastingen, aan het programma van eisen kan een besluit worden genomen over het definitieve ontwerp van de installatie en over de bouwwijze van de kamer.

Sedert de studie van de in dit artikel genoemde problemen ter hand is genomen, zijn, in toenemende mate, geprefabriceerde klimaatkamers door de industrie leverbaar. Het blijkt dat alle toekomstige gebruikers hieraan de voorkeur geven boven vast in gebouwen te installeren klimaatkamers. Ook voor deze geprefabriceerde kamers geldt dat het niet altijd vooraf duidelijk is wat de eigenschappen van de gekozen luchtbehandelingssystemen zijn, welk klimaat men mag verwachten en wat de exploitatiekosten zullen zijn. Is derhalve het in dit artikel beschreven berekeningsvoorbeeld gebaseerd op een vast in een gebouw geïnstalleerde kamer, de gekozen methode is direct toepasbaar op geprefabriceerde kamers. De methode is eveneens geschikt voor toepassing voor kamers met natuurlijke belichting (kassen), stallen, respiratiecellen [12] of champignoncellen. De elektrische analoge simulatiemethode kan dus worden gebruikt om een zeer grote verscheidenheid van vaak gecompliceerde luchtbehandelingsinstallaties te toetsen op de functionering in de praktijk.

In hoeverre naast de elektrische analoge simulatiemethode ook andere methoden bruikbaar kunnen

zijn voor de hier vermelde studie, is nog niet met zekerheid aan te geven. De kortelings beschikbaar gekomen hybride computers zullen waarschijnlijk eveneens goede mogelijkheden bieden, terwijl digitale programma's zoals het „continuous system modeling program" van IBM, studies als deze wellicht ook mogelijk zullen maken.

Tenslotte dient opgemerkt te worden dat het uitvoeren van deze studies van fundamentele aard, onafhankelijk van de gekozen rekenwijze, veel tijd vraagt en daardoor ook kostbaar is. Hierdoor en vanwege de relatief geringe omzet van plantengroei kamers zal de industrie vooralsnog slechts in

beperkte mate onderzoek op dit gebied kunnen verrichten.

Aan de totstandkoming van het analogon is in belangrijke mate bijgedragen door de heer G. Brouwer, destijds medewerker bij de Technisch Physische Dienst TNO-TH, thans bij het Technisch Adviesbureau Van Heugten N.V.

De auteurs zijn de Commissie Fytotrons TNO van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek zeer erkentelijk voor de toestemming tot het publiceren van de berekeningen.

Literatuur

- [1] Mogelijkheden en moeilijkheden bij de inrichting van fytotrons.
Rapport samengesteld door de Commissie Fytotrons TNO van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek (1968) (april).
- [2] Beek, A. M. K. van, en R. Koppe: Technische aspecten van de luchtbehandeling van klimaatkamers voor biologisch onderzoek.
Commissie Fytotrons TNO van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek (1969) (juni).
- [3] Beek, A. M. K. van: Enkele aspecten bij het ontwerp en de bouw van fytotrons.
1. Algemene beschouwing. Koeltechniek 61 (1968) (8) 149
- [4] Beek, A. M. K. van, en R. Koppe: Enkele aspecten bij het ontwerp en de bouw van fytotrons.
2. Technische beschouwing. Koeltechniek 62 (1969) (8) 164.
- [5] Enquête Fytotrons I. Rapport samengesteld door de Commissie Fytotrons TNO van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek (1968) (juni).
- [6] Gröber/Erk: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, bearbeitet von U. Grigull, Springer Verlag, Berlin (1963).
- [7] Karplus, W. J.: Analog Simulation.
Mc Graw-Hill Book Company, Inc. New York (1958).
- [8] Kusuda, T.: in Humidity and Moisture, Vol. 1 (ed. R. E. Ruskin).
Reinhold Publishing Corporation, New York (1965).
- [9] Gaastra, P.: Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance.
Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen 59 (1959) nr. 13.
- [10] Lenz, H.: Dynamik der Regelstrecke von Klima-Anlagen.
Thesis T. H. Karlsruhe (1964).
- [11] Profos, P. en P. Hemmi: Untersuchungen zur Dynamik der Klimaregelung.
Neue Technik 7 (1965) A2.
- [12] Koppe, R. en G. van Kempen: Description of the climatized respiration chamber of the Department of Animal Husbandry of the Agricultural University, Wageningen.
Verwarming en Ventilatie 28 (1971) (6).

Nomenclatuur

a	: temperatuurvereffeningscoëfficiënt, m ² /s	n	: aantal, ook constante in vergelijking 18
A	: oppervlakte, m ²	p ₁ , p ₂	: dampspanning, N/m ² of mmHg
b	: afmeting, m	p _b	: verzadigde dampspanning in bladoppervlak, N/m ² of mmHg
c, c _p	: soortelijke warmte, J/kg.K	p _i	: ingaande dampspanning, N/m ² of mmHg
C	: warmtecapaciteit, J/K	p ₁	: dampspanning, N/m ² of mmHg
C _v	: warmtecapaciteit van de verdamper, J/K	p _u	: uitgaande dampspanning, N/m ² of mmHg
d	: wanddikte, m	p _v	: dampspanning op verdamper, N/m ² of mmHg
f ₁₂	: vormfactor	p _w	: dampspanning op een oppervlak, N/m ² of mmHg
h	: afmeting, m	q _a	: advectieve waterdampmassastroom, kg/s
h ₁ , h ₂ , h _m	: enthalpie, J/kg	q _c	: waterdampmassastroom, kg/s
k	: discretisatieparameter in vergelijking 2, ook exponent in vergelijking 9	q ₁ , q ₂	: massastroom (lucht), kg/s
l	: afmeting, m	q _v	: volumestroom, m ³ /s
Le	: kengetal van Lewis		
m	: constante in vergelijking 18		
M	: molaire massa van water, kg/mol		

r	: verdampingswarmte, J/kg	v	: luchtsnelheid, m/s
r_b	: bladweerstand, s/m of sc/m	x	: plaatscoördinaat
r_l	: overgangsweerstand blad-lucht, s/m of s/cm	x_1, x_2, x_m, x_r	: waterdampconcentratie, kg/kg
R	: molaire gasconstante, J/(mol.K)	$\hat{x}$	: verzadigingsconcentratie, kg/kg
R_a, R_c, R_g, R_s	: weerstand, K/W	α_c, α_s	: warmteoverdrachtscoëfficiënt, W/(m ² .K)
R_{wa}, R_{wb}, R_{wc}	: weerstand K/W	β	: massaoverdrachtscoëfficiënt, m/s
t	: tijd, s of h	η	: rendement
$T, T_1, T_2, T_k, T_l, T_m, T_w, T_x$	: temperatuur, °C of K	λ	: warmtegeleidingscoëfficiënt, W/(m.K)
$T_i, T_{i,n}$	: ingaande luchttemperatuur, °C of K	μ	: gedefinieerd volgens vergelijking (13)
$T_u, T_{u,n}$	: uitgaande luchttemperatuur, °C of K	ρ	: dichtheid, kg/m ³
T_v	: verdampertemperatuur, °C of K	Φ	: warmtestroom, W
$T_w, T_{w,n}$	: wandtemperatuur, °C of K	Φ_v	: warmtestroom onttrokken aan verdamper, W